

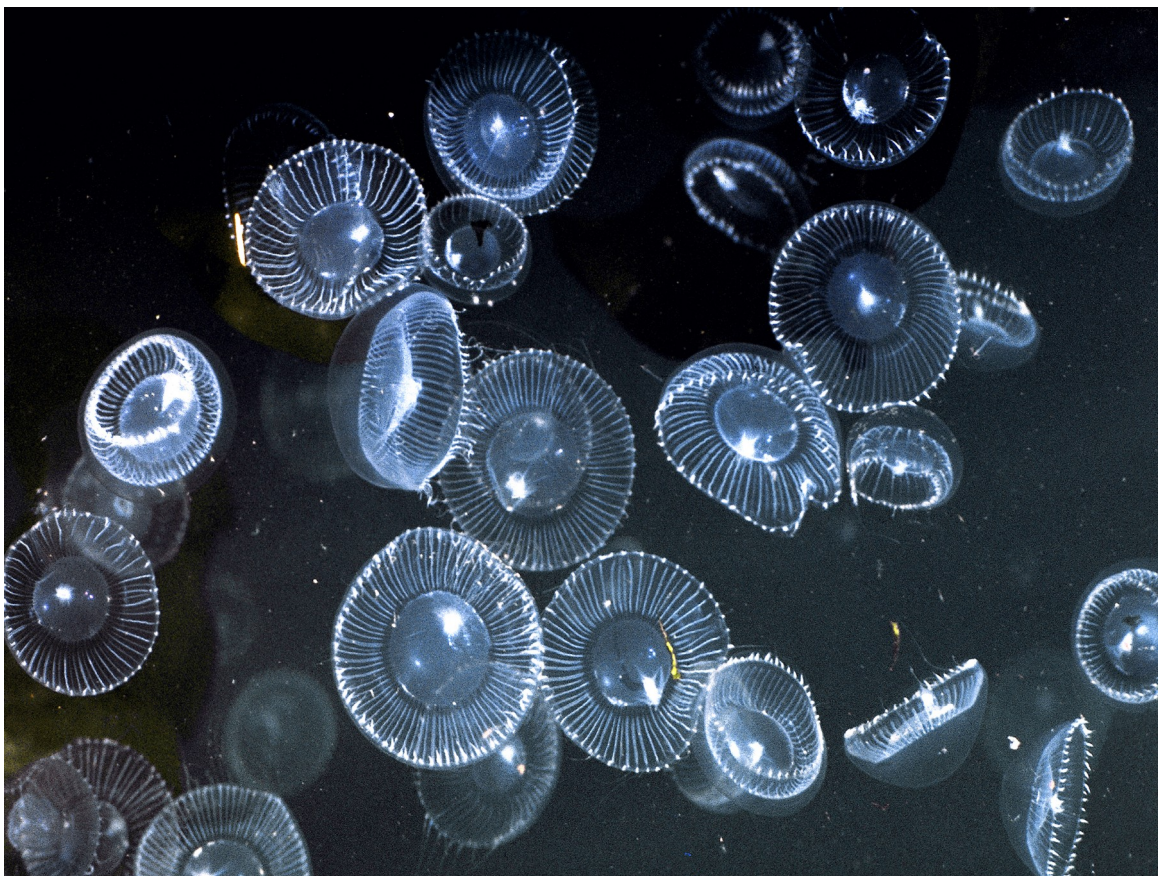
DRAUSSIN Julien  
GARCIA BOURREE Jade  
QUIOT Estevan

## Travaux Pratiques Encadrés

### *La (bio)luminescence*

« Le ver luisant annonce que le matin est proche,  
et commence à pâlir ses feux impuissants... »

Hamlet, Shakespeare



## TPE – La (bio)luminescence

introduction.....	p.3
I- Observation de la bioluminescence chez le vivant.....	p.4
1- Définitions et historique.....	p.4
2- Différents types d'êtres vivants et rôles de bioluminescence.....	p.6
3- Différents types de bioluminescence intra/extra cellulaire.....	p.8
II- Matérialisation du phénomène luminescent.....	p.11
1- Autres types de luminescence et exemple des aurores polaires.....	p.11
2- synthèse du liquide bioluminescent (expérience).....	p.13
3- explication de l'expérience.....	p.15
III- Conséquences pour l'homme et application.....	p.18
1- Criminologie.....	p.18
2- Utilisation pour détecter la pollution.....	p.19
3- Utilisation pour l'agroalimentaire.....	p.20
4- Utilisation dans le milieu médical.....	p.21
5- Utilisation pour l'éclairage.....	p.22
Conclusion.....	p.24
Carnet de bord (Jade).....	p.25
Synthèse personnelle (Jade).....	p.28
Carnet de bord (Estevan).....	p.30
Synthèse personnelle (Estevan).....	p.33
Carnet de bord (Julien).....	p.34
Synthèse personnelle (Julien).....	p.37
Bibliographie.....	p.39

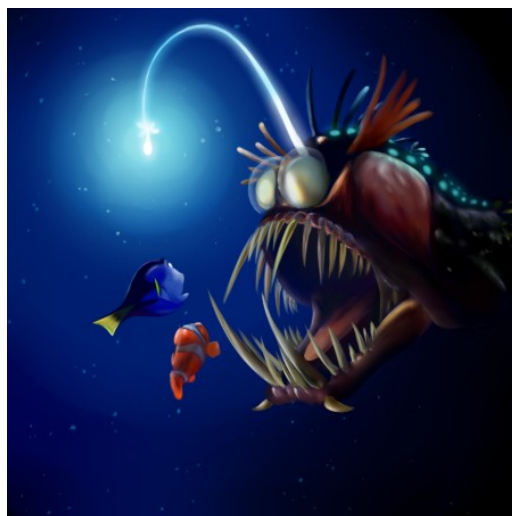
## Introduction

Nous avons pris le parti de traiter le phénomène de la bioluminescence et de ses dérivés pour sujet de notre TPE. En effet à partir de l'observation de lucioles nous nous sommes interrogés et avons décidé de mener une réflexion pour appréhender ce sujet. Les lucioles, les vers luisants et les lampanyres sont des familles de coléoptères qui regroupent quelques deux mille espèces d'insectes produisant leur propre lumière. Ce sont les premiers êtres vivants dont nous gardons trace de l'observation des hommes comme nous le montre un écrit chinois datant entre 1 500 et 1 000 ans avant J.C. Ces êtres capables de luire dans le noir sont des représentants de la bioluminescence et d'un phénomène plus général et divers : la luminescence.

Nos considérations se sont portées essentiellement sur la bioluminescence elle-même à travers différentes espèces pour essayer de comprendre son rôle et son fonctionnement précis. Puis comme la luminescence est un sujet très vaste, nous avons étudié l'un de ses phénomènes et la synthèse de la luminescence en reproduisant la bioluminescence ce qui nous amène à changer de catégorie. C'est en s'inspirant de cette même bioluminescence ou en l'utilisant à travers les individus qui possèdent des aptitudes à luire que l'homme a lié la luminescence à son quotidien.

Les grandes idées que nous venons de citer sont par ailleurs les axes qu'ont suivi nos réflexions après avoir posé la problématique suivante : comment, à partir de son observation, l'homme a-t-il pu appliquer les fonctionnements de la bioluminescence à son échelle ?

Pour répondre à cette question nous étudierons dans un premier temps l'observation de la bioluminescence chez le vivant puis le phénomène luminescent et à sa matérialisation, enfin ses conséquences pour l'homme et ses applications avant de conclure.



## I- Rôle de la bioluminescence

Avant de pouvoir utiliser les phénomènes luminescents dans sa vie quotidienne, l'homme a dû comprendre le fonctionnement de celle-ci en observant la nature qui l'entoure : en observant la bioluminescence que pouvait générer certains êtres vivants.

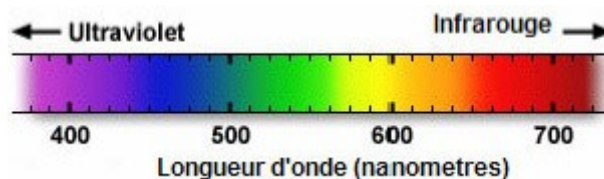
Dans un premier temps nous allons donc définir le terme de luminescence et les aspects qui en découlent. S'en suit un historique retraçant la compréhension des hommes sur cette particularité lumineuse de la nature.

Dans un deuxième temps, les différents types d'êtres vivants bioluminescents vont être présentés ainsi que les multiples rôles de celle-ci.

Enfin pour clôturer cette partie, nous allons dans un troisième temps, définir les différents types de bioluminescence.

### 1.1- Définitions

Tout d'abord nous allons définir ce qu'est la luminescence. En effet il s'agit d'un phénomène d'émission de lumière ou plus précisément d'un rayonnement électromagnétique. Cette diffusion de lumière peut intervenir dans les trois domaines qui composent la lumière à savoir le domaine visible (dans les longueurs d'onde comprises entre 380 à 670 nanomètres), le domaine des ultraviolets (dans les longueurs d'onde inférieures à 380 nanomètres) et le domaine infrarouge (dans les longueurs d'onde supérieures à 670 nanomètres). L'émission de lumière n'est pas d'origine thermique car ce n'est pas une source chaude : on parle de source froide.



Les sources froides sont des émissions lumineuses qui s'effectuent sans échauffement particulier. Les spectres émis par ces sources sont discontinus ; on parle de spectre de raies ou assimilées.

Lorsque l'on parle de luminescence on peut aborder le terme de bioluminescence où le préfixe « bio » indique l'origine de cette luminescence qui n'est autre que les êtres vivants. Il s'agit de production puis d'émission de lumière par un organisme vivant (végétaux, animaux) comme nous allons pouvoir le voir plus tardivement.

Quand la production de lumière de la luminescence n'est pas d'origine vivante mais due à une réaction chimique, on parle alors de chimiluminescence. Cette réaction chimique est provoquée par une interaction entre le luminol et un hydroxyle (comme l'eau oxygénée par exemple).



## 1.2- Historique

La luminescence a beaucoup fasciné les hommes au cours des siècles. Les phénomènes bioluminescents (chez les insectes et les champignons notamment) et luminescents (aurores polaires) présents dans la nature ont intrigué dès la préhistoire.

Les hommes ont longtemps lié ces phénomènes à des forces divines, surnaturelles, liées à des superstitions.

Un écrit chinois datant entre 1 500 et 1 000 ans avant J.C nous donne des indications sur l'observation de la bioluminescence chez les vers luisants et les lucioles : il semble être la mention la plus ancienne concernant ce sujet.



Les philosophes grecs tels qu' Anaximenes (600av J.C) et Aristote (350av J.C) observent des phénomènes luminescent à travers la phosphorescence de la mer et les aurores boréales par exemple. Durant le premier siècle ap. J.C, Pline décrit différentes espèces d'êtres vivants luminescents tels que le vers luisant, la pholade et un champignon.

Au Moyen-Âge, il n'y a pas eu de notables observations sur la bioluminescence car l'esprit intellectuel est plus attiré par le ciel que par la nature. Les superstitions persistent durant cette longue période (les lucioles étaient considérées comme réincarnations des esprits des ancêtres disparus).

Ce fut vers 1400 que Gonzalo Fernandez Oviedo, un historien espagnol, décrit dans son œuvre Historia General y Natural de los Indias les insectes luminescents appelés Cucujos.

Vers 1555 Conrad Gessner écrit le premier livre entièrement consacré à la bioluminescence. Cette œuvre retranscrit toutes les connaissances réunies jusqu'à ce jour par les différents observateurs.

C'est en 1669 que Brant a découvert l'élément phosphore.

Grâce à leurs expériences, Robert Boyle puis J. Priesley démontrent que le phénomène bioluminescent nécessite un apport d'oxygène.

Dans le cadre de sa théorie de l'évolution, Darwin s'intéresse à la bioluminescence animale.



La découverte majeure dans ce domaine fut mise en évidence par le physicien français Raphaël Dubois qui écrit pour la première fois l'équation de la réaction chimique provoquée lors du phénomène de bioluminescence et découvre la luciférine et la luciférase.

C'est en 1934 que Huntress, Stanley et Parker découvrent le luminol (principal réaction à la chimiluminescence).

William D. Mc Elroy démontre que le phénomène bioluminescent nécessite la présence d'ATP et d'ions magnésium.

A travers cet historique nous remarquons que la première apparition de la bioluminescence ne peut être datée. On sait que le caractère luminescent n'est pas apparu à un moment précis à

l'échelle du temps et que les animaux bioluminescents n'ont parfois pas d'ancêtres communs. En effet la bioluminescence est apparue chez des espèces très variées et éloignées qui ont conduit les

biologistes à admettre que la bioluminescence est apparue de façon indépendante au cours de l'évolution.

## **2- Différents types d'êtres vivants / rôles**

### **L'éclairage :**

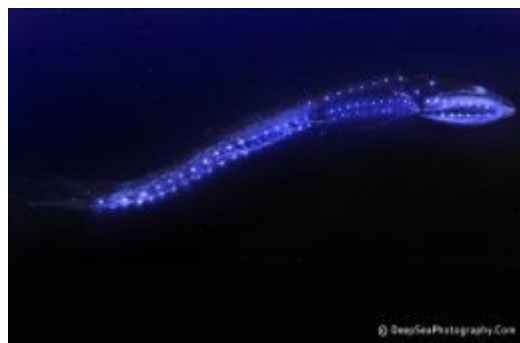
Les lucioles utilisent la bioluminescence pour illuminer les sites d'atterrissage (feuille, brindille) ou de ponte.

Dans les fonds marins, les chercheurs estiment que 95 % des individus récoltés à moins de 4km utilisent la bioluminescence pour s'éclairer. Il s'agit d'une des fonctions évidentes de la bioluminescence : éclairer. En effet les grands fonds sont plongés dans l'obscurité et les animaux envoient des signaux lumineux, qui une fois réfléchis par tout obstacle ou objet permet d'apparaître dans leur champs visuel. Les signaux lumineux sont émis par des organes électroluminescents appelés photophores (on peut les trouver chez les poissons et les céphalopodes). Ils sont placés sur la tête de l'individu afin d'éclairer son champs visuel avant ; à l'arrière des yeux pour éclairer le champ visuel latéral et avant (pour les luminescences les plus puissantes) ou le long du tronc qui éclairent uniquement les champs latéraux.

La couleur de la lumière utilisée dans les fonds marins n'est pas due au hasard. Puisque l'eau de mer fait baisser l'intensité de la lumière en absorbant facilement les radiations dans le domaine ultraviolet et dans l'intervalle des longueurs d'onde qui correspondent à un rayonnement rouge, les animaux bioluminescents émettent généralement une lumière bleue qui circule plus facilement (leur cônes sont donc plus sensibles à cette couleur). Toutefois, certaines espèces utilisent de la lumière rouge malgré qu'elle soit facilement absorbée par l'eau salée pour éclairer leur champs visuel sur de petites distances.



L' Argyropelecus



Krill bioluminescent

### **Signes de reconnaissance spécifique (parade nuptial, reconnaissance entre espèce, communication) :**

Il a été observé que les insectes qui ont des capacités bioluminescentes émettent des signaux lumineux (qui peuvent être sous forme brève avec des flash périodiques comme pour les lampyres ou encore une émission continue comme pour les lucioles) afin d'attirer leur partenaire sexuel par le biais d'une communication qui s'apparente à la parade nuptiale. Les lumières perçues peuvent permettre au mâle de savoir si la femelle est une bonne reproductrice potentielle car l'intensité lumineuse varie suivant l'âge de l'individu. On suppose que les mâles et les femelles ont des signaux lumineux différents qui permet de les reconnaître (on parle de dimorphisme sexuel) malgré que le

comportement de ces espèces reste incertain. De plus on trouve de nombreuses variantes des signaux entre les espèces il peut s'agir de la fréquence, de la longueur d'onde de la lumière, de sa durée et de son intensité. L'utilisation de la bioluminescence chez les bactéries est une forme de communication qui pourrait être à l'origine de la création des colonies bactériennes lors de la symbiose entre bactéries et espèce hôte.



La pieuvre Japetella

**La protection (Surprise, Camouflage, répulsion) :** Certaines méduses l'utilisent comme moyen de défense : elles luisent pour éclairer leur prédateur et l'exposer à des animaux encore plus gros.

Nous avons pu constater un fait qui n'a pu être expliqué chez certains types d'algues marines appelées Dinoflagellées. En effet des expériences ont démontré que les algues lumineuses étaient moins consommées que les algues qui n'émettaient pas de stimulation mécanique de court éclair. La bioluminescence sert ici de répulsion car la lumière perturbe le mécanisme des prédateurs pour se nourrir.

Certains grands animaux exagèrent leur taille en illuminant leur propre silhouette ce qui fait un effet de surprise et faire parfois fuir les prédateurs qui vont se focaliser sur d'autres proies plus faciles.

Quelques animaux n'hésitent pas à sacrifier un membre de leur corps pour servir d'appât et divertir le prédateur car il sera attiré par le fragment lumineux.

Les crevettes, dégagent d'un coup de queue un nuage de substance lumineuse pour détourner le prédateur et s'enfuir.

Le barracuda utilise une défense lumineuse élaborée. En alternant des clignotements et des flashes pour perturber le prédateur afin qu'il ne puisse pas déterminer la position de l'individu chassé.



La meduse Atolla

**La prédation :** en effet certains animaux utilisent la bioluminescence pour se nourrir. Ainsi certains poissons produisent de la lumière pour attirer leurs proies. En voici quelques exemples.



Les poissons pêcheur, (*Melanocetus Johnsoni*) attirent justement les petits poissons grâce à leur organe lumineux

fixé sur le haut de leur tête avant de les dévorer.

L'exemple de la luciole femelle (*Photuris*) est très étonnant. Elle est capable d'imiter le signal lumineux d'une parade sexuelle d'une autre espèce, comme celui des *Photinus*. Elle attire donc les mâles de cette espèce qui se posent près d'elle, puis les dévore.



L'*Erythrina* (*Erythrina*, nommée couramment "la danseuse espagnole abyssale"), de la famille des concombres de mer est un animal dont la peau granuleuse s'illumine et peut se détacher lorsque l'individu est en danger afin de se coller sur le museau de l'agresseur et de le rendre vulnérable. Puisqu'il ne peut se défaire de la peau bioluminescente extrêmement collante.

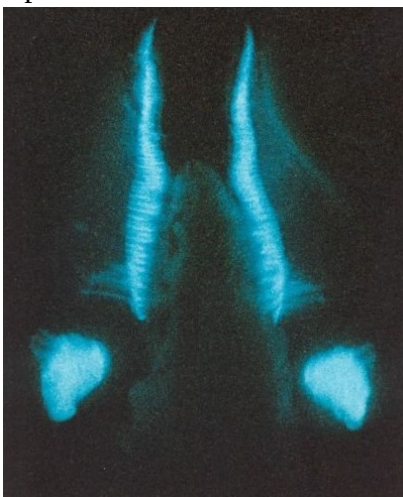
### 3- Différents types de bioluminescence intra/extra cellulaire

Chez les animaux, il existe deux types d'organes lumineux :

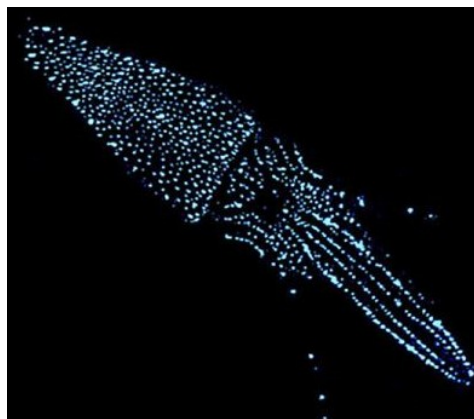
3.1- Le premier type consiste en cellules glandulaires spécialisées dans l'élaboration des produits nécessaires à la bioluminescence, leur stockage et éventuellement le contrôle de leur réaction.

3.1.1- Pour certaines espèces, ces cellules glandulaires émettent leurs sécrétions à l'extérieur, produisant ainsi une **luminescence extracellulaire**, souvent associée à du mucus (ex : pholade, crustacés, annélides et calmars). Cette bioluminescence extracellulaire est réalisée à partir de la réaction entre la luciférine et la luciférase, une enzyme. L'expulsion et le mélange de chaque réactif à l'extérieur produit des nuages lumineux.

La pholade

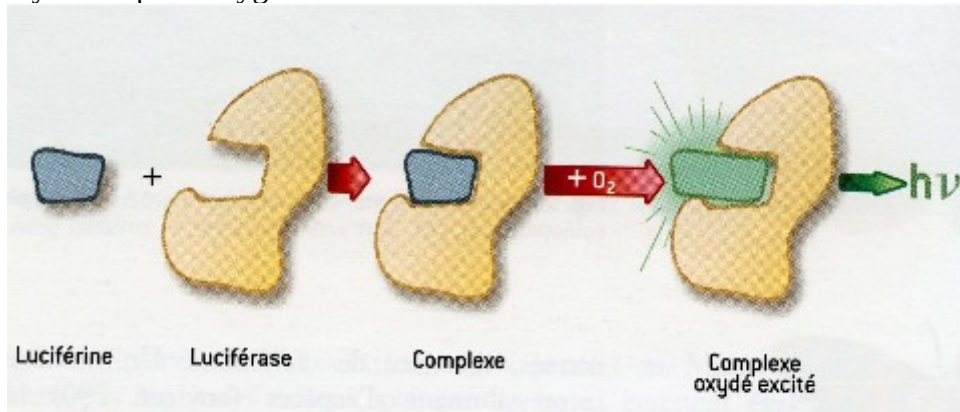


Le calamar



3.1.2- Chez d'autres animaux, la luminescence reste à l'intérieur des cellules, la lumière est émise vers l'extérieur à travers la peau ou intensifiée par des lentilles et des matériaux réfléchissants : il s'agit d'une **luminescence intracellulaire**.

Les zones lumineuses renferment des cellules modifiées appelées photocytes. Ces cellules contiennent des structures particulières : les photosomes formés par les tubules du réticulum endoplasmique. La luminescence est liée à un changement de la perméabilité de la membrane du réticulum endoplasmique qui met en contact la luciférine et la luciférase. Cette dernière catalyse l'oxydation par l'oxygène moléculaire  $O_2$  de la luciférine.



L'énergie nécessaire pour réaliser cette opération est stockée dans la molécule ATP (Adénosine Tri-Phosphate). Cette molécule est présente chez tous les êtres vivants notamment pour le métabolisme. Son rôle principal est de fournir l'énergie nécessaire aux réactions chimiques de cellules. Elle stocke et transporte l'énergie au sein de l'être vivant.

Les photocytes peuvent être soit répartis dans tout l'organisme (chez les méduses par exemple), soit dans des photophores, (ce sont des organes lumineux où sont regroupés des photocytes. Ils se forment au niveau de l'épiderme. Du côté interne, ils possèdent un réflecteur qui renvoie les rayons lumineux émis par les photocytes vers l'extérieur. La couleur de la bioluminescence peut être modifiée par un filtre coloré composé de cellules pigmentaires (filtre d'absorption) ou de couches réfléchissantes qui ne laissent passer que certaines longueurs d'onde (filtre d'interférence).



Euphausiacés (*krill*)

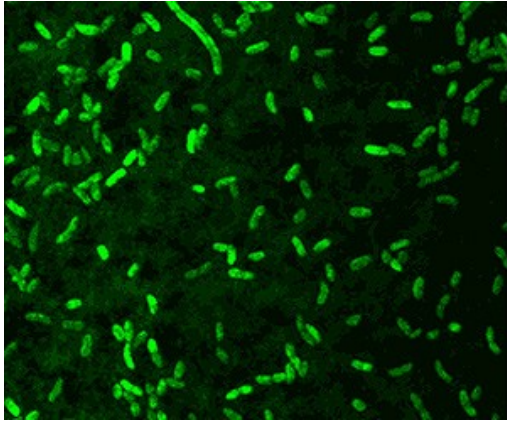
duse aequora



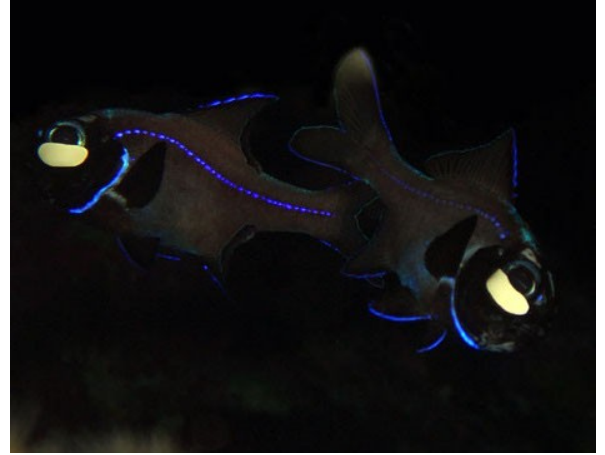
Mé

Photo of Aequorea Victoria, Kevin Raskoff

3.2- Le 2ème type d'organes lumineux ne contient pas de photocytes, la lumière est produite par des bactéries lumineuses symbiotiques. Il semble que ce soit le type de bioluminescence le plus répandu du règne animal. À différents endroits du corps, les animaux disposent de photophores qui renferment des bactéries lumineuses. Certaines espèces produisent de la lumière continue dont l'intensité peut être neutralisée ou modulée au moyen de diverses structures spécialisées. Les organes lumineux sont généralement reliés au système nerveux ce qui permet à l'animal de contrôler l'émission lumineuse.



bactéries lumineuses *Aliivibrio fischeri*



*Poissons phare*

La bioluminescence est donc une propriété particulière que possèdent de nombreux êtres vivants, qu'ils expriment de manières et dans un but très différents. Ce phénomène a toujours impressionné mais également intrigué les hommes qui ont su aux cours des siècles le définir et le comprendre. La question à se poser est dorénavant : comment peut-on reproduire cette luminescence de manière artificielle ?

## II- Matérialisation du phénomène lumineux

Nous avons vu précédemment que la luminescence pouvait provenir d'êtres vivants : c'est la bioluminescence. Cependant, nous nous sommes demandés si seuls les êtres vivants étaient capables de produire de la bioluminescence. Nous avons donc trouvé d'autres types de bioluminescence comme la photoluminescence qui sera développée dans cette partie. Ensuite nous avons voulu matérialiser nous même ce phénomène pour savoir si l'Homme pouvait le contrôler et s'il pouvait être utilisé au quotidien par l'Homme.

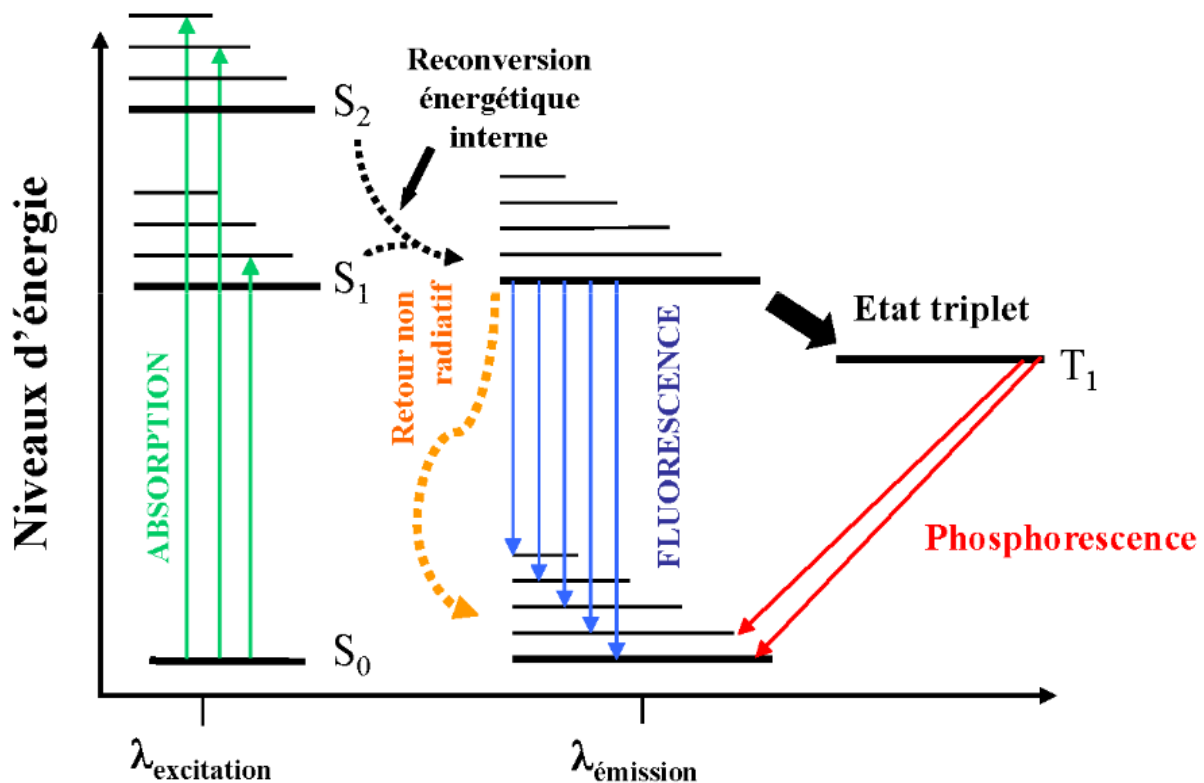
### 1.1- Autres types de luminescence

On parle de phosphorescence lorsqu'une matière continue à émettre de la lumière dans le noir après avoir été éclairée. C'est le phosphore blanc qui donne de la lumière dans le noir grâce aux réactions d'oxydation (c'est de la chimiluminescence).

La fluorescence quant à elle est une émission lumineuse provoquée par l'absorption d'un photon (excitation de la molécule) suivie d'une émission spontanée.

La fluorescence et la phosphorescence sont deux formes différentes de luminescence.

Le diagramme de Jablonski (physicien polonais) illustre fort à propos, la différence au niveau des électrons de ces deux phénomènes.



## 1.2- Exemple des aurores polaires

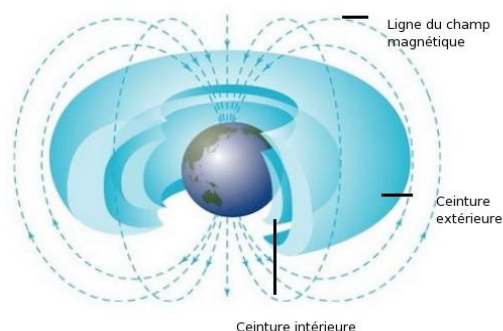


Les aurores polaires désignent un phénomène lumineux atmosphérique dans les grandes latitudes (au nord ce sont les aurores boréales et au sud les aurores australes). Les particules électrisées précipitées dans la haute atmosphère forment des voiles aux couleurs intenses (avec la couleur verte comme prédominance). Ces aurores ne sont pas uniquement terrestres (il en existe sur Jupiter) car elles dépendent uniquement de l'activité du soleil et du champ magnétique

Les aurores sont modélisables comme l'a réalisé Auguste de la Rive au XIX<sup>ème</sup> siècle mais dès l'antiquité, Aristote et d'autres grands philosophes grecs se sont lancés dans les observations des aurores polaires et des phénomènes de luminescence qui leur sont associés. Les aurores polaires émettent de la lumière froide sans subir d'échauffement particulier grâce à une excitation atomique.

Ce phénomène de luminescence est spécifiquement de la photoluminescence car il s'agit d'une absorption de lumière ultraviolette ou de lumière émise dans le domaine visible. La photoluminescence des aurores polaires appartient au phénomène de la phosphorescence car elles continuent à émettre de la lumière après que ces molécules aient finies de se désexciter en passant par un état intermédiaire.

Le phénomène commence par la circulation permanente d'un vent solaire. Lors de la rencontre entre les particules d'électrons et de protons projetées avec le champ terrestre de la Terre, les particules sont conduites aux deux pôles en suivant les lignes du champ magnétique avant de s'accumuler dans une zone appelée « ceintures de Van Allen ».



Néanmoins il n'y a pas nécessairement formation d'aurores polaires dès que le vent solaire rencontre l'atmosphère terrestre car il faut une quantité de particules minimal pour avoir assez d'énergie nécessaire à l'excitation des atomes.

Après avoir étudié la bioluminescence et à présent la photoluminescence nous allons exploiter le phénomène de chimiluminescence que nous avons matérialisé.

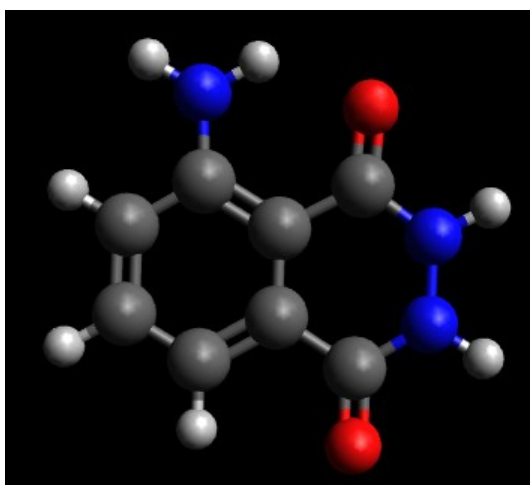
## 2- synthèse du liquide bioluminescent (expérience)

Nous avons décidé de synthétiser du liquide luminescent afin de modéliser et de pouvoir observer directement le phénomène que nous étudions. Pour cela, nous avons eu besoin de :

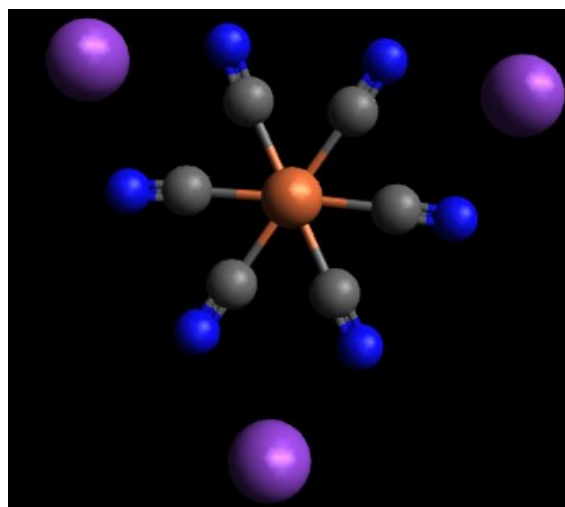
- d'hydroxyde de sodium NaOH
- de hexacyanure de potassium  $K_3[Fe(CN)_6]$
- de luminol  $C_8H_7N_3O_2$
- du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) à 30 % pour 110 volumes
- de l'eau distillée ( $H_2O$ )
- 3 béchers de 500mL
- 3 coupelles
- une cuiller
- une éprouvette graduée
- une balance de précision



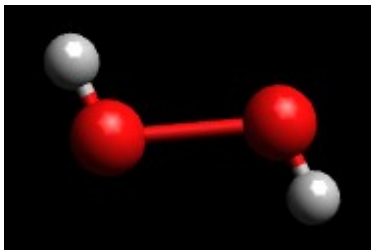
Voici les représentations moléculaires des réactifs utilisés :



Le Luminol



L'hexacyanure de potassium



Le peroxyde d'hydrogène



L'hydroxyle de sodium

A l'aide de la balance nous avons peser et prélever respectivement dans 3 coupelles différentes 2g d'hydroxyde de sodium, 0,2g de luminol et 2g d'hexacyanure de potassium. A l'aide de la pipette graduée on remplit deux béchers (que l'on appelle A et B) avec respectivement 50ml d'eau distillée dans chacun.



Dans le béchers A, on ajoute les grains d'hydroxyde de sodium puis on agite jusqu'à dissolution puis on ajoute le luminol et l'eau oxygénée jusqu'à obtenir une solution homogène trouble.

Dans le béchers B, on ajoute l'hexacyanure de potassium que l'on dissout. On obtient une solution jaune.



Nous nous sommes ensuite isolés dans une pièce sombre afin de continuer notre expérience dans des conditions d'obscurité optimales afin de visualiser la luminescence sans qu'aucune autre lumière (lumière du jour, lampe) ne vienne corrompre l'expérience.

Dans cette pièce sombre, nous avons versé dans le troisième bécher autant de solution A que de solution B (d'abord en petite quantité pour vérifier que l'expérience a abouti). On observe alors



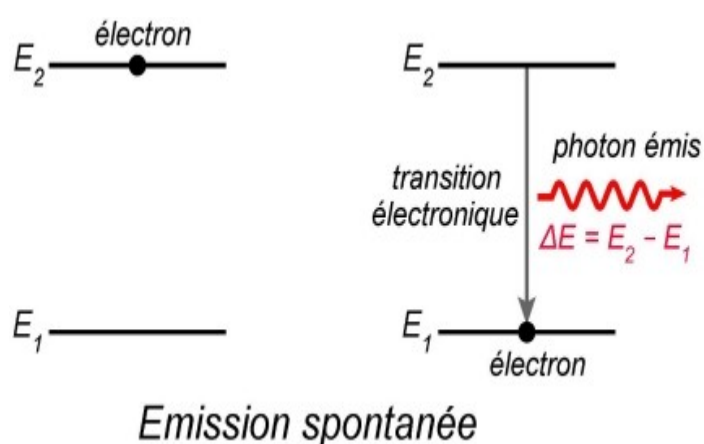
le phénomène de luminescence tant espéré. Le dégagement de lumière est bleue et verte mais est très bref.

On entend un léger bruit qui est caractéristique d'un dégagement de gaz. On répète plusieurs fois le mélange pour observer l'émission de luminescence à quelques reprises. Une fois la luminescence achevée et que nous sommes retournés dans une salle à la lumière du jour on observe que la solution finale est jaune.

### 3- explication de l'expérience

Nous allons maintenant pouvoir interpréter les résultats obtenus et les expliquer.

La lumière émise par une source lumineuse contient de nombreuses longueurs d'onde, visibles comme invisibles (dans l'infrarouge ou dans l'ultraviolet en particulier). Si lors de la réaction nous avons pu voir le liquide luminescent dans le noir c'est que celui-ci a produit des radiations dans le domaine du visible. La production de lumière est due comme pour tous les objets à un changement d'état de la part des électrons. Ainsi, ils passent d'un niveau excité à un niveau excité plus faible, ou au niveau d'énergie le plus bas dit état fondamental.



Dans le cas de notre expérience, les électrons retombent à l'état fondamental après avoir été excités lors de l'oxydation du luminol dans le milieu basique de la solution A. La consommation progressive des différents réactifs entraîne une baisse de l'intensité.

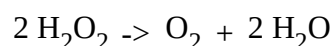
Dans notre expérience, cette production de photons par les atomes se déroule en 2 étapes:

#### Étape 1:

La première étape de cette réaction chimique s'appelle la dismutation du peroxyde d'hydrogène.

La dismutation est une réaction à l'issue de laquelle deux atomes identiques, situés initialement au même degré d'oxydation, se retrouvent l'un à un degré d'oxydation supérieur, l'autre à un degré inférieur.

La dismutation du peroxyde d'hydrogène s'effectue selon cette réaction :



Seulement si on laisse le peroxyde d'hydrogène seul, la réaction ne se fait pas. En effet, elle est bloquée « cinétiquement ». C'est à dire que la réaction est trop lente pour se produire. C'est ici que le fer présent dans l'expérience va jouer son rôle. En effet, il est ce que l'on appelle un catalyseur. Un catalyseur est une substance qui accélère une réaction chimique afin que celle-ci puisse se

produire. Cet élément n'est pas pour autant un produit ou un réactif (il participe à la réaction sans apparaître dans l'équation bilan). N'étant pas consommé par la réaction chimique, on le retrouvera à la fin de la réaction puisqu'il n'a pas subi de modifications. Au cours de notre expérience.

Cette étape est indispensable pour le bon fonctionnement de la réaction chimique et permet de réaliser la deuxième étape aboutissant sur la production de lumière.

## **Étape 2 :**

Grâce à la dismutation du peroxyde d'hydrogène, la solution contient désormais des molécules de dihydrogène ( $O_2$ ). Ce sont ces molécules qui permettent d'exciter la molécule de luminol. En effet, des ions d'oxygène ( $O^-$ ) vont prendre la place des NH (liaison entre un atome d'azote et d'hydrogène) au sein de la molécule de luminol. Ce changement de structure moléculaire va déboucher sur l'excitation de cette nouvelle molécule. Cette dernière va ensuite chercher à revenir à un niveau d'énergie plus bas et plus stable en émettant un photon. On remarque que cette réaction ne peut se produire qu'en milieu basique. Ainsi, les ions  $OH^-$  qui caractérisent une solution basique sont indispensables afin d'obtenir les ions d'oxygène.

L'équation de notre réaction est donc la suivante:

On remarque qu'à la fin de la réaction, on obtient des molécules de diazote ( $N_2$ ). Ces molécules sont à l'origine du gaz libéré lors de l'expérience. Nous avons en effet aperçu de petites bulles le long de la paroi du bécher.

Dans cette expérience nous sommes donc parvenus à créer de la lumière à partir d'un liquide plongé dans le noir. La molécule n'a donc été excitée par l'apport d'énergie ne provenant ni d'un proton (lumière) ni de la chaleur (thermique). Nous sommes donc parvenus à créer une source froide à l'origine de la production de lumière. Nous avons ainsi matérialiser la luminescence.

Cependant, l'émission lumineuse, même si elle fut intense, ne dura que quelques instants. Une fois tous les réactifs consommés, la réaction se termine et ceux-ci se consomment rapidement. Ce système se révèle donc peu utile pour une utilisation quotidienne puisqu'il nécessite beaucoup de réactif pour un résultat extrêmement limité dans le temps.

Dans cette partie, nous avons pu voir que la luminescence ne provenait pas forcément d'un organisme vivant et qu'il existait d'autre type de luminescence que la bioluminescence. En effet, les aurores polaires constituent un bel exemple d'un autre type de luminescence nommée la photoluminescence. Nous avons ensuite effectué l'expérience de notre TPE en modélisant un liquide luminescent afin de savoir si l'Homme pouvait se servir de ce phénomène comme outil de la vie

quotidienne. Si notre réaction chimique avec du luminol a fonctionné et que nous sommes parvenus à l'expliquer, il s'avère que notre expérience se révèle peu utile pour la vie de tous les jours. Effectivement, la réaction a consommé un grand volume de liquide pour une action dans le temps très limitée. Même si cette réaction n'est pas pratique, nous avons trouvé que la luminescence pouvait être très utile à l'Homme sous d'autres formes.

### III- Conséquences pour l'homme et application

Comme nous avons pu le voir, la luminescence que nous avons observée au sein de la biodiversité peut être artificiellement synthétisée par l'homme. Le but d'une telle manœuvre peut être mis à profit de nombreux domaines. Par ailleurs l'utilisation d'individus présentant les propriétés d'être bioluminescents peut également s'avérer pertinente. Les quatre principaux domaines d'utilisation de cette science complexe qu'est la luminescence sont énumérés dans le tableau suivant avec des exemples concrets de mise en œuvre.

#### ***Application de la luminescence par l'homme***

Agro-alimentaire	<ul style="list-style-type: none"><li>- contrôle de stérilité des aliments, des emballages</li><li>- suivi de l'hygiène</li><li>- suivi de fermentation</li><li>- contrôle des procédés</li></ul>
Médical	<ul style="list-style-type: none"><li>- contrôle de stérilité de préparation injectable</li><li>- contrôle de vaccins</li><li>- contrôle de cellules cancéreuses</li><li>- dermatologie...</li></ul>
Environnement	<ul style="list-style-type: none"><li>- traitement des eaux résiduelles</li><li>- suivi de décharge</li><li>- évaluation de l'activité microbienne</li><li>- test de toxicité</li></ul>
Divers	<ul style="list-style-type: none"><li>- stérilité de produits cosmétiques</li><li>- contrôle de la dégradation des textiles par des agents microbiens</li><li>- armes bactériologiques</li></ul>

Dans cette optique, nous allons développer et mettre en évidence certaines de ces applications dans les lignes qui vont suivre. Étant donné le nombre de possibilités d'exploitation, nous avons choisi de ne travailler que sur certaines d'entre elles dans diverses catégories. Nous allons donc pouvoir nous intéresser à divers utilisations comme en criminologie, pour détecter la pollution, puis dans l'agro alimentaire dans le milieu médical et enfin dans l'éclairage.

#### **1- La criminologie**

La principale utilisation de la chimiluminescence est faite par la police scientifique. En effet, ce phénomène est appliqué pour détecter les traces de sang même si elles sont en très faible quantité car nettoyées. Ces traces de sang, invisibles pour l'œil humain, vont émettre au cours de la réaction une lumière (chimiluminescence) permettant de localiser les zones où il y a eu du sang.

Pour mettre en évidence le sang et créer la réaction de chimiluminescence, la police scientifique utilise une solution contenant du luminol, de l'hydroxyde de sodium et de peroxyde d'hydrogène dilué. Cette solution est commercialisée sous le nom de « BLUESTAR ». Il s'agit en fait de la même solution préparée au cours de notre expérience. La seule différence est qu'il manque à cette solution le ferricyanure de potassium. Nous avons expliqué précédemment que le ferricyanure de potassium joue le rôle de catalyseur au sein de notre expérience. Pourtant la présence d'un catalyseur est indispensable pour la décomposition du peroxyde d'hydrogène. On en déduit donc que le sang

contient un élément capable de jouer le rôle de catalyseur.

Ce sont les globules rouges, cellules sanguines ayant pour fonction le transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone vers les différentes parties de l'organisme, qui contiennent l'élément catalyseur. Ainsi ces cellules sont composées d'hème. Il s'agit d'une molécule constituée d'ion fer (II). C'est justement cet ion fer (II) qui a la capacité de jouer le rôle de catalyseur.

La réaction de la solution avec le luminol produit une lueur bleutée comme nous pouvons le voir sur cette image :

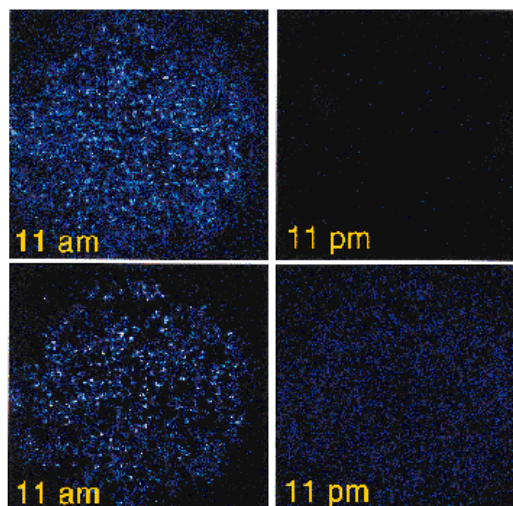


Cependant le résultat donné par le luminol n'est pas entièrement fiable et comporte des limites pour cette application. En effet le luminol peut aussi détecter les traces d'eau de javel et cache des potentielles taches de sang.

## **2- Utilisation pour détecter la pollution**

Edith Widder est un spécialiste en bioluminescence, domaine qu'il a étudié pendant plus de trente ans à travers des plongées sous marines afin d'observer les cas de bioluminescence en milieu naturel. Ce chercheur est à l'origine d'une nouvelle technique expérimentale qui permet de détecter la pollution dans des sédiments grâce à des bactéries luminescentes appelées vibrio fischeri. Ce sont les bactéries synthétisées par les différents organismes qui produisent de la lumière, comme 90 % des espèces animales qui vivent dans le milieu aquatique des grandes profondeurs.

En effet ces bactéries sont sensibles à des composés chimiques toxiques présents dans les milieux pollués, ce qui provoque leur mort. Si la bactérie meurt, elle n'émet plus de lumière par bioluminescence et on peut donc détecter le niveau de pollution du milieu grâce à un protocole simple. On prélève dans le fond des estuaires de la boue (il s'agit de sédiments) dans lesquels on mélange les bactéries bioluminescentes. Dans des conditions d'obscurité, on observe et quantifie la quantité de lumière émise par les bactéries grâce à un photomètre. Le photomètre est un appareil



servant à mesurer des intensités lumineuses par comparaison ou lecture seule. En effet quand la présence de polluants dans les sédiments augmente, les bactéries meurent en plus grand nombre, la bioluminescence diminue et l'intensité lumineuse observée également.

On peut donc déceler le niveau de pollution grâce à l'importance de l'intensité lumineuse observable et la vitesse à laquelle celle-ci diminue. Ce protocole reste toutefois approximatif car il est très difficile de quantifier la présence de pollution ; néanmoins cela permet de se faire une idée de la concentration de la pollution de l'estuaire étudié. Contrairement à l'analyse des sédiments classiques qui se fait en laboratoire (des systèmes de mesure de la pollution en continu par des nitrates existent aussi mais sont peu répandus) qui nécessitent plusieurs jours, cette technique présente l'avantage non négligeable de réaliser des mesures très rapidement, presque en temps réels.

En couplant ces données avec la pose de capteurs dans le fleuve (mesurant la vitesse et la direction des courants subis par l'eau) on peut déterminer la cause de la pollution, son origine et parfois y remédier. On parle d'observations exotoxicologiques. Grâce l'étude des polluants présents dans les sédiments nous pouvons avoir une meilleure indication sur l'état de santé du cours d'eau qu'une étude effectuée sur des échantillons d'eau. Cette étude sur les sédiments est efficace car les éléments chimiques présents dans les sédiments subsistent au sein des cours d'eau durant de plus longues périodes que les polluants dilués dans l'eau.

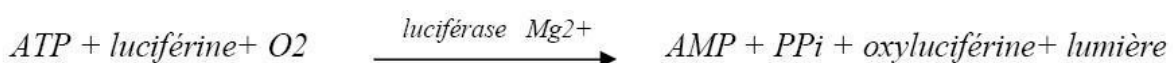
Edith Widder a validé ses expériences en étudiant la pollution présente au sein de l'Indian River Lagoon (située sur la façade Atlantique de la Floride). Grâce à ces bactéries, elle a pu montrer que le site était fortement pollué par des métaux lourds, des éléments nitrates et phosphate (sachant que la concentration trop importante en ces éléments peut être responsable de détérioration de l'écosystème).

Cette technique peut rendre la pollution visible au grand public, ce qui permet de sensibiliser les personnes aux dangers de la pollution plus facilement avec un élément visuel plutôt qu'avec des chiffres et inciter les gens à faire des efforts.

### **3- Utilisation pour l'agro alimentaire**

La bioluminescence permet à l'homme de détecter la quantité de biomasse. La biomasse désigne la masse totale d'organismes vivants dans un biotope (est un milieu qui héberge un ensemble de formes de vie composant la biocénose: flore, faune, fonge) déterminé à un moment donné. Elle peut être estimée par unité de surface s'il s'agit d'un milieu terrestre ou bien par unité de volume s'il s'agit d'un milieu aquatique.

L'agro-alimentaire et l'environnement sont les domaines les plus importants d'application de la bioluminescence. Par exemple, on peut évaluer la flore microbienne présente dans un liquide (eau lait...). alors, si l'intensité lumineuse due à la bioluminescence est trop importante, on peut donc affirmer qu'il y a dans le liquide analysé une grande concentration de flore microbienne.



Cette intensité lumineuse est due à une réaction chimique entre l'ATP, apportée par la biomasse présente dans le liquide, la luciférine ajoutée et le dioxygène présent dans l'air. Cette réaction produit de la lumière (ainsi que de l'Adénosine monophosphate, du Pyrophosphate et de l'oxyluciférine). Ce processus ne peut se produire qu'en présence de luciférase  $Mg^{2+}$ , cette molécule n'est pas utilisée dans la réaction mais est indispensable (catalyseur).

## 4-Utilisation dans le milieu médical

Cette réaction chimique est aussi utilisée dans le domaine médical :

>**L'imagerie bioluminescente** ou optique est praticable par le fait que dans chaque êtres vivants il y a présence d'ATP (celle-ci est indispensable pour de nombreuses réactions du métabolisme cellulaire). Néanmoins cette lumière ne peut être vue à l'intérieur du corps où elle a été ingérée seulement à travers une caméra ultrasensible possédant une haute résolution. Cette dernière détecte les photons émis par la lumière en in vivo ( évoque la pratique d'un expérience sur un être toujours en vie) sur les petits animaux .

On peut s'en servir pour la détection des caractéristiques tumorales ou cancéreuses précoces sur des petits animaux. En effet cette technique n'est pas encore pratiquée sur des humains mais seulement sur de petits êtres vivants.

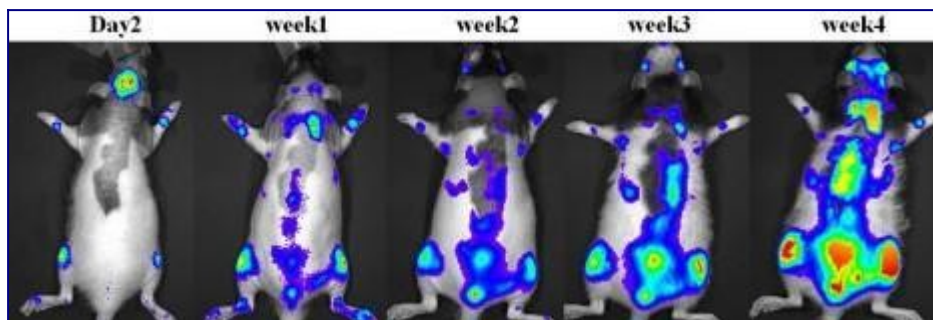
L'utilisation de la bioluminescence permet de nombreuses applications dans le milieu de l'imagerie médicale, en voici quelques exemples :

**Cancérologie:** La bioluminescence permet de repérer la propagation et évaluer la croissance de ces cellules cancéreuses et donc en suivant l'évolution de celle-ci au cours d'un traitement voir si ce dernier est efficace ou non. Ce procédé permet d'évaluer l'efficacité d'un protocole thérapeutique génétique.

Exemple : Test de cancérologie avec la bioluminescence sur des rats :

Ces rats ont subit une injection de cellules du cancer du seins. Ensuite on leur transfère des cellules infectées par un gène responsable de la production de luciférase. Cette dernière va catalyser l'oxydation de la luciférine (injectée précédemment), résultant d'une émission de photons détectés par la caméra ultra sensible. Ces cellules en se décuplant transmettrons leur bioluminescence ce qui identifiera à travers l'imagerie seulement les organismes infectés

Puis l'on effectue un traitement de l'image obtenue qui calibre la quantité lumineuse émise par les cellules selon le gradient de couleur voulu ou utilisé. Ici le palmarès de couleurs utilisées est l'évolution du bleu au rouge.



Plus la couleur se rapproche du bleu, plus la répllication virale est faible et inversement pour les couleurs se rapprochant du rouge.

**Virologie :** Ce même procédé est utile pour d'autres virus, qui ont pu grâce à cette méthode être observés de plus près.

### >**L'ATPmétrie**

La bioluminescence non seulement utile pour l'imagerie permet de nombreuses détections

médicales grâce à la possibilité de quantifier la biomasse d'un échantillon via un luminomètre, qui grâce à cette réaction calcule le dosage de l'ATP.

Quelques exemples :

- Les maladies hépatiques car le taux d'ATP baisse dans les hématies.

- la dermatologie car l'ATP s'utilise pour voir à quelle vitesse se renouvellent les cellules de la peau.

- Les infections urinaires car certains malades atteints d'infections urinaires présentent un taux de bactéries croissant dans les urines, le taux d'ATP est donc croissant aussi.

- Dépistage des infarctus cardiaques par détermination des substrats et enzymes intervenant dans le dépistage.

- Détection d'alcoolisme et cirrhose par la baisse du taux d'ATP des globules rouges (anémie hémolytique).

- La dermatologie car l'ATP s'utilise pour voir à quelle vitesse se renouvellent les cellules de la peau.

- Connaître le taux de contamination d'un liquide physiologique.

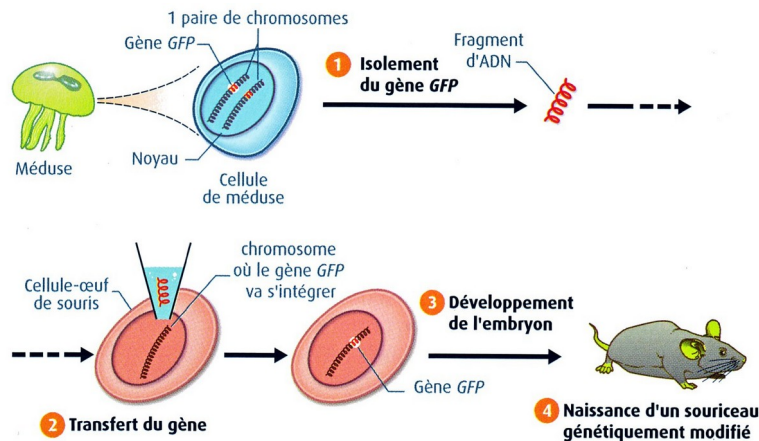
## **5- Utilisation pour l'éclairage**

Certains scientifiques émettent l'hypothèse d'utiliser la bioluminescence pour remplacer les réverbères et ampoules électriques dans le paysage urbain (dans un premier temps) à travers un projet nommé « glowing plants ».



Pour cela, il serait envisageable de rendre des plantes bioluminescentes artificiellement en injectant des gènes de spécimens possédant des propriétés bioluminescentes (comme des bactéries marines ou l'agrobactérium ) dans une cellule souche. Pour obtenir ces gènes afin que les plantes soient compatibles on mélange de l'ADN d'organites présents dans les cellules des plantes (chloroplastes) avec celui des bactéries possédant les propriétés lumineuses et on l'injecte dans une cellule de plante qui va se développer et former une plante luminescente OGM (car elle sera génétiquement modifiée). Ce phénomène est une transgénèse. Dans la nature, l'entrée de l'ADN bactérien dans une cellule végétale provoque chez cette dernière des galles (tumeurs) qu'il est possible de désarmer en laboratoire (en supprimant la région responsable de la maladie).

Schéma d'explication du phénomène de transgénèse :



Ce projet présente quelques inconvénients malgré l'avantage d'avoir des paysages énergiquement neutre (pas de consommation d'énergie électrique) et "poétique" (à l'image des paysages fictionnels visibles dans le film *Avatar*). Par exemple, l'efficacité de l'éclairage public actuel serait environ mille fois plus importante que serait supposé l'être celui des végétaux bioluminescents. Par ailleurs, ces expériences de transgène bioluminescentes sont compliquées à réaliser et seules de petits spécimens ont pu être conçus pour l'heure comme le plant d'une petite plante de la famille des Brassicacées appelé Arabidopsis qui ressemble au chou.



A travers ces exemples, nous avons pu voir que des bactéries bioluminescentes permettaient de mettre en évidence la pollution de l'eau, les bactéries dans les produits de consommation dans le domaine de l'agroalimentaire. La luminescence est utilisée pour détecter certaines maladies, ou des taches de sang lors d'enquêtes scientifiques. La bioluminescence est une science actuelle et à venir comme nous le montre le projet potentiell de remplacer les éclairages de lampadaires par des plantes rendues artificiellement luminescentes. Nous pouvons donc voir que les applications de la bioluminescence et de la luminescence en général sont nombreuses chez l'homme.

## Conclusion

A travers ces différentes parties, nous avons pu voir que la bioluminescence est une propriété physique possédée par de nombreux êtres vivants. Ce phénomène qui a toujours intrigué les hommes peut s'exprimer de plusieurs manières dans des buts divers. La bioluminescence fait partie de la luminescence, or cette dernière existe sous différentes formes comme, par exemple, la photoluminescence, la phosphorescence, la fluorescence de plus la bioluminescence. A travers une expérience, nous avons montré comment les hommes se sont inspiré de celle-ci afin de la synthétiser (et ainsi créer de la chimiluminescence) afin de l'adapter à ses besoins et pouvoir l'utiliser. Malgré que la promptitude de notre réaction chimique ne puisse être exploitée dans la vie quotidienne, les hommes ont pu utiliser la luminescence sous d'autres formes. L'exploitation de ces sciences se révèlent très utiles pour des domaines très variés et semble pouvoir se développer dans les années à venir suivant différents projets, et pourquoi pas, d'innovations. Nous pouvons donc dire que l'homme a pu appliquer de différentes manières les fonctionnements de la bioluminescence en exploitant des individus eux même lumineux ou bien en synthétisant son phénomène.



## Carnet de bord Jade Garcia Bourrée

### **Séance du 08/09/14 :**

Objectif séance : Présentation des TPE, formation du groupe et premières recherches Recherche collective de quelques pistes en lien avec les illusions entropiques. On part d'observation : comment le phénomène fonctionne-t-il ?, pourquoi ?, nous recherchons d'autres illusions et progressons dans nos recherches.

Seconde idée : nous pourrions élargir notre sujet avec les illusions auditives entre autre.

Nous ne sommes pas sur de continuer sur cet axe-là, l'idée ne satisfait pas toutes nos exigences et n'intéressent pas tout les membres du groupe. Il est difficile de faire aboutir nos réflexions sans point de départ pour le moment, les idées fusent mais ne sont pas retenues.

Objectif séance prochaine : continuer la recherche d'un sujet

### **Séance du 15/09/14 :**

Objectif de la séance : continuer la recherche d'un sujet en essayant de trouver des pistes de réflexion sur <http://eduscol.education.fr/>

Nous abandonnons l'idée des illusions car il serait difficile de pouvoir expliquer de possibles expériences avec précision sans matériel spécifique. Nous nous intéressons à une innovation récente : les imprimantes 3D.

On s'interroge sur la modélisation d'opérations pour s'exercer à la médecine (imprimante 3D, virtualisation et autres solutions).

Nos recherches partent dans plusieurs directions et s'éloignent parfois de l'idée générale en faveur d'autre idées. On pourrait penser que ce soit une perte de temps, or comme nous n'avons pas encore fixé notre thème il s'agit d'une chance de trouver quelque chose de vraiment pertinent.

On se renseigne sur beaucoup de chose : « simulateur ou la panoscopie » ou mini-invasive, les premières expériences de Vésale sur les cadavres, à des expériences sur des mannequins, des robots. Il existe des simulateurs pédagogiques.

La recherche de premières pistes se concrétisent avec des sites que nous retenons dans un premier temps (thèse sur la chirurgie virtuelle sur la modélisation en temps réels des tissus mous, des interactions et du système haptique mis en abîme avec un article sur le simulateur hépatique. Mise en abîme des deux sources)

Idée d'une expérience : prélèvement d'un rein d'une souris morte pour matérialiser expérience de Vésale. (pistes : médecine de la Renaissance, Miguel Servet).

Objectif séance prochaine : continuer à se documenter et à chercher de possibles expériences plus importantes et significatives.

### **Séance du 22/09/14 :**

Après des réflexions hors des heures de cours, nous nous sommes livrés à une évidence : les expériences qui nous viennent à l'idée ne sont guère nombreuse et peu pertinente. Le sujet semble tourner en « exposé » et nous décidons de changer d'axe sans perdre plus de temps.

Objectif séance : trouver absolument un sujet

Une idée fuse : la bioluminescence. Tant de chose se cache derrière ce mot, nos neurones s'activent. Pour l'expérience : observation chez un animal, regardes des cellules lumineuses ou modéliser le phénomène.

Recherche de contacts et prise en notes d'adresse mail, de numéro de téléphone pour contacter des personnes compétentes en cas de nécessité.

Nous effectuons divers recherches et commençons a relever des sources d'informations d'apparence fiables et qui peuvent être exploitées.

Objectif séance prochaine : continuer les recherches et déterminer nos axes de réflexion.

**Séance du 29/09/14 :**

Objectif séance : continuer les recherches.

Nous avons continué nos recherches afin d'avoir une documentation suffisante et savoir si le sujet que nous avons choisi est bien propice aux TPE. Nous avons pu axer nos recherches pour voir les limites du sujet et ne pas s'en éloigner.

Objectif séance prochaine : recherche d'une problématique

**Séance du 06/10/14 :**

Objectif séance : recherche d'une problématique

Nous avons continué notre documentation et réussi à définir une problématique provisoire.

Objectif séance prochaine : essayer de définir un plan

**Séance du 03/11/14 :**

Objectif séance : essayer de définir un plan

Nous avons élaboré de nombreuses réflexions afin de déterminer un plan qui soit à la fois original et pertinent.

Objectif séance prochaine : réfléchir à une expérience

**Séance du 10/11/14 :**

Objectif de la séance : préparer le protocole de l'expérience en détail et définir les résultats à obtenir

Nous avons cherché une expérience à réaliser et un protocole expérimental que nous pourrions réaliser. A force de recherche et de réflexion, nous avons pu le préparer.

Objectif séance prochaine : donner le protocole aux préparatrices et optimiser notre travail.

**Séance du 17/11/14 :**

Objectif de la séance :

- donner le protocole de notre expérience aux préparatrices
- commencer la rédaction de notre production écrite
- trier nos sources pour en garder l'essentiel et toutes les réunir

Nous aimerions observer la lumière grâce à un spectroscope.

Recherche sur l'historique : des premiers noms tombent : Edith Widder et Raphael Dubois

Rédaction de la partie sur l'utilisation de la bioluminescence pour détecter la pollution.

Objectif séance prochaine : réalisation de l'expérience

**Séance du 24/11/14 :**

Objectif séance : réalisation de l'expérience

Étant donné que cette séance est dédiée à la réalisation de notre expérience, le travail manuel nous occupée tout au long de la séance. Estevan filme et prend des photos pendant que Julien et moi versons les éléments après les avoir quantifiés. Le tout se déroulant sous la supervision de notre professeur de physique-chimie. L'expérience fut concluante.

Objectif séance prochaine : expliquer l'expérience

**Séance du 01/12/14 :**

objectif séance : chercher des renseignements sur l'expérience afin de l'expliquer.

Prise de données sur la fluorescence (ce que nous avons fait). C'est un phénomène très rapide.

Serait-il possible de prolonger la réaction en ralentissant la désexcitation des atomes ou même faire une autre expérience avec la phosphorescence pour avoir un élément de comparaison. Le phosphore qui sera en jeu dans cette expérience sera radioactif et peut-être nocif (expérience déconseillée par notre professeur) donc nous changeons d'idée.

Objectif séance prochaine : Nous nous répartissons les tâches avant de diviser le groupe. Je vais devoir rédiger et expliquer la manipulation réalisée dans notre expérience.

**Séance 08/12/14 :**

Objectif séance : Je vais devoir rédiger et expliquer la manipulation réalisée dans notre expérience. J'ai expliqué la manipulation de l'expérience et commencer à chercher les équations pour déterminer les réactions observées et réalisées.

Objectif séance prochaine : rejoindre Julien dans ses nombreuses recherches et faire des recherches sur la chronologie historique.

**Séance du 15/12/14 :**

Objectif séance :

- Faire des recherches sur la chronologie de la bioluminescence et des hommes
- répondre aux questions et continuer les recherches

J'ai fait des recherches sur la chronologie puis ai ajouter une partie sur la photoluminescence des aurores polaires

Objectif séance prochaine : continuer la rédaction du TPE et avancer le III.

**Séance du 05/01/15 :**

Objectif séance : rédaction de la production écrite et recherches pour le troisième axe  
Je me suis chargée de rédiger les deux premières sous-parties de la première partie (définitions et rôles de la bioluminescence chez les animaux en particulier).

Objectif séance : rédiger et commencer a rassembler des illustrations et trier les sources utilisées

**Séance du 12/01/15 :**

Objectif séance :

- rédiger et commencer a rassembler des illustrations et trier les sources utilisées
- rédiger l'introduction

Je me suis chargée de la rédaction de l'introduction en rassemblant de nouvelles données.

Objectif séance prochaine : rédiger le dossier

**Séance du 19/01/15 :**

Objectif séance : rédiger le dossier

J'ai fini de rédiger la première grande partie (premier axe) et de l'illustrer.

Objectif séance prochaine : continuer la mise en œuvre de la production écrite.

**Séance du 26/01/15 :**

Je suis absente.

## Synthèse personnelle Jade Garcia Bourrée

Pour préparer et réaliser l'épreuve du baccalauréat dédié aux travaux pratiques encadrés (TPE), il a fallu, dans un premier temps, choisir de former un groupe de travail. Pour cela, j'ai procédé par déduction et ai choisi mes camarades Julien Draussin et Estevan Quiot pour plusieurs raisons. En effet ce sont des élèves sérieux, engagés et dynamiques qui ne manquent pas d'imagination et d'initiative ce qui se révèlent être des qualités précieuses pour ce travail. De plus nous sommes en relation depuis longtemps et habitons non loin les uns des autres ce qui peut s'avérer être un atout majeur et un gain de temps pour travailler hors du temps scolaire.

Comme nous sommes tous les trois en série scientifique, les disciplines que nous devons travailler impérativement dans notre TPE sont les sciences de la vie et de la terre (SVT) et la physique-chimie. De plus, le sujet de notre travail doit s'inscrire dans l'un des six thèmes proposés dans le cadre des TPE. C'est par ailleurs le choix d'un de ces thèmes, et par conséquent plus précisément du sujet qui nous a posé le plus de soucis au cours de cette année. Après quelques divagations au cours des deux premières semaines, notre choix c'est finalement porté, après s'être intéressé aux illusions entropiques et aux technologies de la médecine qui se sont avérés être des sujets qui ne satisfaisaient pas tous les membres du groupes, sur une science qui nous était obscure et intrigante : la bioluminescence. Celle-ci peut s'inscrire dans le thème « matière et forme » car il s'agit d'étudier la matière vivante et sa capacité à produire de la lumière ainsi qu'une transformation de la matière par synthèse de luminescence.

Une fois le sujet posé, il a fallu faire de multiples recherches pour acquérir des notions fondamentales et définir les limites du sujet. C'est dès cet instant que nous avons pu déterminer notre problématique et commencer à axer nos recherches de sorte de former un plan rationnel et ordonné. Celui-ci nous permettra de répondre à notre problématique à travers différentes notions qui se répartissent dans les disciplines qui nous sont imposés. Le plan a pu être complété et amélioré au fil de notre travail, de nos recherches et de réflexions avant d'atteindre sa forme finale.

La phase de recherche s'est avérée la plus consciencieuse et la plus longue de notre travail. La rédaction de celui-ci pu commencer et pris forme aux fils des heures. Nos recherches se sont accompagnées de nombreuses interrogations auxquelles nous avons trouvé réponses à force de persévérance. Nous nous sommes séparés afin d'obtenir un meilleur rendement et de ne pas perdre du temps. Les parties qui étaient traitées par les uns fut relues et complétées par les autres, souvent en dehors du temps scolaire consacrés aux TPE, afin de favoriser notre esprit de groupe et de concilier nos points de vue.

Nous avons interrompu cette phase aux alentours de novembre afin de pouvoir mettre en place notre expérience après en avoir établi le protocole. Tandis que nos manipulations se faisaient dans la plus grande précaution et une organisation harmonieuse, nous avons pu obtenir des résultats très satisfaisants que nous avons pu filmer et prendre en photo. Les résultats ont été concluants et en cohérence avec notre travail qui liait la bioluminescence à son utilisation par l'homme par synthèse.

Faute de temps, et ayant une charge de travail conséquent, il nous a été nécessaire d'organiser quelques séances supplémentaires notamment pour finaliser le dossier écrit et réaliser le diaporama qui sera support de notre présentation orale devant le jury.

La progression régulière de notre travail s'est déroulée dans un temps convenable et nos objectifs à la fois collectif et personnels ont été réalisés. Le dynamisme de notre groupe a su surmonté les quelques difficultés qui s'imposaient à nous (choix du sujet, compréhension des aspects très techniques et précis de la luminescence que nous avons matérialisés).

Finalement, le travail réalisé tout au long de l'année dans le cadre des TPE m'a permis de prendre conscience de la patience et du temps qu'il était utile de mettre en œuvre pour comprendre la bioluminescence. La bioluminescence, à juste titre, s'inscrit dans le phénomène complexe de la luminescence, que je ne pensais pas si vaste. Pourtant, malgré l'étendu des recherches que nous avons du faire (principalement issu d'internet) il s'est avéré que la luminescence est un domaine très intéressant et que j'ai pris plaisir à traiter. Le travail de groupe et la confiance qui a été mise en œuvre me paraît à présent essentiel et précise, ce qui, avec du recul, est un enseignement personnel que j'ai pu tirer de notre TPE.

La méthodologie que nous avons adoptée au fil des mois m'a enrichie et m'a enseigné des valeurs d'auto-discipline et d'organisation sur le long terme que ce soit en groupe ou individuel.

La production de notre travail résulte finalement d'un investissement très fructueux et profitable, d'une part pour le travail collectif comme, d'une autre part, d'un travail personnel pour ma propre expérience.

## Carnet de bord Estevan Quiot

### **Séance du 08/09/14**

Objectif séance : Présentation des TPE, formation du groupe et premières recherches collectives sur les illusions entropiques. On se pose les questions : comment le phénomène fonctionne-t-il ?, pourquoi ?, nous recherchons d'autres illusions et progressons dans nos recherches.

Nous voulons ensuite élargir notre sujet avec les illusions auditives.

Nous arrêtons les recherches sur ce thème car l'idée n'intéresse pas tout le groupe et puis les expériences à réaliser étaient compliquées par manque de matériel. De plus le sujet n'était pas très original.

Objectif séance prochaine : continuer la recherche d'un sujet

### **Séance du 15/09/14**

Nous abandonnons l'idée des illusions car il serait difficile de pouvoir expliquer de possibles expériences avec précision sans matériel spécifique. Une autre idée est proposée: les imprimantes 3D. Notre réflexion se porte sur la modélisation d'opérations pour s'exercer à la médecine (imprimante 3D, virtualisation et autres solutions).

Nos recherches ne nous satisfaisaient pas et nous nous éparpillons sur le sujet.

On se renseigne sur beaucoup de chose : « simulateur ou la panoscopie » ou mini-invasive, les premières expériences de Vésale sur les cadavres, à des expériences sur des mannequins, des robots, les simulateurs pédagogiques.

Nous avons quelques pistes avec des sites que nous retenons dans un premier temps.

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/> thèse sur la chirurgie virtuelle sur la modélisation en temps réels des tissus mous, des interactions et du système haptique. <http://www.pourlascience.fr/> article sur le simulateur hépatique.

Notre idée d'expérience était le prélèvement d'un rein d'une souris morte pour matérialiser expérience de Vésale.

Objectif séance prochaine : continuer à se documenter et à chercher de possibles expériences plus importantes et significatives.

### **Séance du 22/09/14**

Nous nous rendîmes vite compte que nos idées d'expériences nous venant à l'esprit ne sont guère nombreuses et peu pertinentes.

L'idée de la bioluminescence fut choisie. Ce thème nous intriguait et nous décidâmes de répondre aux questions qui se cachaient derrière ce mot. Notre idée d'expérience : observer un animal luminescent, regarder des cellules luminescentes ou modéliser le phénomène.

Nous effectuons divers recherches et commençons à relever des sources d'informations d'apparence fiables et qui peuvent être exploitées.

Objectif séance prochaine : continuer les recherches et déterminer nos axes de réflexion.

### **Séance du 29/09/14 :**

Nous avons continuer nos recherches afin d'avoir une documentation suffisante et savoir si le sujet que nous avons choisi est bien propice aux TPE. Nous avons pu axer nos recherches pour voir les limites du sujet et ne pas s'en éloigner.

Objectif séance prochaine : recherche d'une problématique

**Séance du 06/10/14 :**

La documentation continua et nous avons quelques idées de problématiques pouvant coller au sujet.  
Objectif séance prochaine : essayer de définir un plan

**Séance du 03/11/14 :**

Entre nos recherches nous avons élaboré un plan convenable qui a plus à tout les groupe.  
Objectif séance prochaine : réfléchir à une expérience

**Séance du 10/11 :**

Nous avons cherché une expérience à réaliser et un protocole expérimental que nous pourrions réaliser. Après de nombreuses recherches nous avons enfin trouvé et rédigé un protocole.  
Objectif séance prochaine : donner le protocole aux préparatrices.

**Séance du 17/11/14**

Le protocole fut donné et nous commençâmes à rédiger la production écrite. Nous trouvâmes des indices sur l'historique : des premiers noms tombent : Edith Widder et Raphael Dubois. La rédaction de la partie sur l'utilisation de la bioluminescence pour détecter la pollution commença.  
Objectif séance prochaine : réalisation de l'expérience

**Séance du 24/11/14**

Nous réalisâmes l'expérience, le travail manuel nous occupée tout au long de la séance. Je filme et prend des photos pendant que Julien et Jade versent les éléments après les avoir quantifié. Le tout se déroulant sous la supervision de notre professeur de physique-chimie. L'expérience fut concluante.  
Objectif séance prochaine : expliquer l'expérience

**Séance du 01/12/14 :**

Nous nous demandâmes s'il est possible de prolonger la réaction en ralentissant la désexcitation des atomes ou même faire une autre expérience avec la phosphorescence pour avoir un élément de comparaison. Le phosphore qui sera en jeu dans cette expérience sera radioactif et peut-être nocif (expérience déconseillée par notre professeur) donc nous changeons d'idée.

**Séance 08/12/14 :**

Nous repartissons le travail. Je commence la rédaction de la partie sur la bioluminescence intra/extra cellulaire. J'ai expliqué la bioluminescence intra/extra cellulaire et a commencé à illustrer cette partie avec des documents.  
Objectif séance prochaine : rejoindre Julien dans ses nombreuses recherches et faire des recherches sur la chronologie historique.

**Séance du 15/12/14**

Julien a compris la dismutation et l'expérience et je l'ai aidé dans ses recherches.  
Objectif séance prochaine : continuer la rédaction du TPE et avancer le III.

**Séance du 05/01/15 :**

Julien et moi avons travaillé sur l'utilisation de la luminescence par l'homme.  
Objectif séance prochaine : rédiger et trier les sources utilisées

**Séance du 12/01/15 :**

J'ai trié les sources et réfléchi à la mise en page du dossier.

Objectif séance prochaine : rédiger le dossier

**Séance du 19/01/15 :**

J'ai fini III-3) et commence 4)

Objectif séance prochaine : continuer la mise en œuvre de la production écrite.

**Séance du 26/01/15 :**

Nous avons fini l'explication de l'expérience par des schémas et avons demandé l'avis des professeurs sur notre dossier.

Objectif séance prochaine : rendre le dossier finalisé.

## Synthèse personnelle- Estevan Quiot

La première chose à faire avant même de commencer les travaux pratiques encadrés (TPE) était de choisir ses partenaires. D'un commun accord nous avons alors décidé, Jade Garcia Bourrée, Julien Draussin et moi, de former un groupe de travail. Ce choix est justifié par la bonne entente qui règne entre nous trois, celle-ci nous permettra par la suite de travailler dans une bonne ambiance. Le sérieux de chacun apportait un élément positif dans la construction de ce projet et facilita sa réalisation. De plus, notre proximité géographique nous a permis de nous voir afin de travailler en dehors des heures en classe prévues pour la réalisation du TPE, durant les vacances ou quelques week-end par exemple.

Après avoir formé le groupe, il a fallu trouver un sujet concernant à la fois la discipline physique-chimie et les sciences de la vie et de la terre (SVT) de la section scientifique. Nous avons mis quelques temps à nous décider car nous n'arrivions pas toujours à nous mettre d'accord où à trouver un sujet convenable. Certains sujets comme « les nouvelles technologies au service de la santé » ou bien « les illusions d'optiques » ont très vite été abandonnés, le premier par manque de bonne expérience à réaliser et le deuxième par son manque d'originalité. Au bout d'un certain temps, nous avons trouvé notre sujet : la bioluminescence. Ce sujet nous plaisait et d'après nos professeurs, l'idée n'avait pas été vraiment beaucoup reprise par d'autres groupes.

Le sujet choisi, nous avons dû donc trouver une problématique et un plan cohérent permettant à la fois d'introduire des notions de physique-chimie et SVT. Ce plan a par ailleurs évolué au cours de l'avancé dans notre TPE.

Ensuite nous avons commencé la phase de recherche. Celle-ci fut la plus laborieuse et longue dans l'ensemble de notre travail. En effet nous ne trouvions pas toutes les informations nécessaires et voulues sur internet. Pour avancer plus rapidement et être plus efficace dans notre production nous nous sommes répartis le travail : chacun traita différentes parties. Nous avons ensuite commencé la rédaction et petit à petit notre dossier commençait à se former et à s'étoffer.

Après quelques semaines, nous avons réalisé un protocole d'expérience que nous avons donné aux préparatrices et avons réalisé l'expérience la semaine qui suivie. Nous devons réaliser un phénomène lumineux. Pour cela nous avons dû manipuler des produits dangereux alors nous avons pris nos précautions et à notre grand bonheur l'expérience s'est déroulée sans encombre et personne n'est mort. Les résultats furent concluants et satisfaisants. De plus ce fut un beau spectacle.

C'est un sujet sur lequel je ne me serais sûrement pas intéressé auparavant mais au fur et à mesure de l'avancé de notre dossier, je trouvais que notre sujet devenait de plus en plus intéressant mais également d'une complexité grandissante. Ce TPE m'a permis de répondre à de nombreuses questions que je me posais sur cette caractéristique particulière de la nature. J'ai pu comprendre les différents aspects de la luminescence, les raisons de ses applications dans le milieu animal et ce que les hommes peuvent tirer de la compréhension de la bioluminescence.

Grâce à ce TPE, j'ai également appris à travailler en groupe sur le long terme et de m'investir sur un travail conséquent qui dura plus de la moitié de l'année scolaire. J'ai dû trouver et adopter un rythme de travail pour pouvoir avancer de manière efficace et rapide sans pour autant négliger la qualité du dossier. Et je pense que grâce à la bonne cohésion du groupe et l'implication rigoureuse de chacun, nous avons pu produire un travail sérieux que j'espère intéressant.

Pour moi, ce TPE fut une expérience enrichissante sur un point de vue intellectuel comme sur un point de vue méthodologique.

## Carnet de bord – Julien Draussin

### **Séance du 08/09/14 :**

Les professeurs qui seront chargés de nous orienter au cours des TPE nous font une présentation de cette épreuve du baccalauréat. Nous recherchons ensuite collectivement un sujet qui intéresse tous les membres du groupe. Notre première idée est de traiter les illusions d'optique. Nous nous posons certaines questions telles que: comment le phénomène fonctionne-t-il ? Nous essayons d'élargir notre sujet en cherchant d'autres illusions et progressons dans nos recherches. Nous nous demandons si il ne faudrait pas inclure les illusions auditives entre autre.

Nous ne sommes pas sur de continuer sur ce sujet, car l'idée n'intéressent pas tout les membres du groupe et semble difficilement expérimentable.

Objectif séance prochaine : continuer la recherche d'un sujet

### **Séance du 15/09/14 :**

Nous abandonnons l'idée des illusions car les expériences sont rares et difficilement explicable. Nous nous intéressons à un autre sujet: la modélisation d'opérations pour s'exercer à la médecine (imprimante 3D, virtualisation et autres solutions).

Nos recherches nous amène à trouver des éléments tels que: « simulateur ou la panoscopie » ou mini-invasive, les premières expériences de Vésale sur les cadavres, à des expériences sur des mannequins, des robots.

Objectif séance prochaine : se documenter sur le sujet.

### **Séance du 22/09/14**

Après avoir réfléchi chez nous individuellement nous nous sommes rendus compte que les expériences qui nous viennent à l'idée sont peu nombreuse et peu pertinente. Le sujet semble tourner en « exposé »

Une idée nous vient à l'esprit : la bioluminescence. Ce sujet intéresse les trois membres du groupe et nous pensons à plusieurs expérience : observation chez un animal, regarder des cellules luminescentes ou modéliser le phénomène. Seulement après avoir pris contact par mail avec des spécialistes, seul la dernière expérience se révèle réalisable.

Nous effectuons divers recherches et commençons a relever des sources d'informations d'apparence fiables et qui peuvent être exploitées.

Objectif séance prochaine : continuer les recherches et déterminer nos axes de réflexion.

### **Séance du 29/09/14 :**

Nous avons continuer nos recherches afin d'avoir une documentation suffisante et savoir si le sujet que nous avons choisi est bien propice aux TPE. Nous avons pu axer nos recherches pour voir les limites du sujet et ne pas s'en éloigner.

Objectif séance prochaine : recherche d'une problématique

### **Séance du 06/10/14 :**

Après avoir rassembler suffisamment de documents, nous avons pu formuler une première problématique qui pourra légèrement évoluer si les nous trouvons d'autres axes de travail.

Objectif séance prochaine : essayer de définir un plan

### **Séance du 03/11/14 :**

Nous avons regroupé les documents trouvés précédemment afin de déterminer un plan qui soit cohérent avec nos axes de recherches.

Objectif séance prochaine : réfléchir à l'expérience de la modélisation de la luminescence et préparer le protocole de l'expérience.

### **Séance du 10/11 :**

Nous avons cherché protocole expérimental de l'expérience avec le luminol. Nous l'avons rédigé et nous l'avons donné aux préparatrices.

Objectif de la séance : - donner le protocole de notre expérience aux préparatrices

- commencer la rédaction de notre production écrite
- trier nos sources pour en garder l'essentiel et toutes les réunir

### **Séance du 17/11/14**

J'ai trouvé un rapport entre l'excitation des atomes et l'émission de luminescence (comme ce que nous étudions cette année en cours de physique-chimie).

Nous aimerions observer la lumière de notre expérience grâce à un spectroscope.

Objectif séance prochaine : réalisation de l'expérience

### **Séance du 24/11/14**

Étant donné que les éléments de notre expérience sont rassemblés nous la faisons. Estevan filme et prend des photos pendant que Jade et moi versons les éléments après les avoir quantifiés. Le tout se déroulant sous la supervision de notre professeur de physique-chimie. L'expérience fut concluante.

Objectif séance prochaine : expliquer l'expérience

### **Séance du 01/12/14 :**

Nous avons cherché des informations sur la fluorescence et la phosphorescence. Seulement une expérience avec le phosphore peut être nocif (expérience déconseillée par notre professeur) donc nous changeons d'idée.

Objectif séance prochaine : Nous nous répartissons les tâches avant de diviser le groupe. Julien explique le fonctionnement de l'expérience.

### **Séance 08/12/14 :**

J'ai cherché à expliquer pourquoi notre expérience produisait de la lumière en essayant de simplifier car la réaction semble complexe.

Objectif séance :- Faire des recherches sur la chronologie de la bioluminescence et des hommes  
- répondre aux questions et continuer les recherches

### **Séance du 15/12/14**

Julien a compris la dismutation et l'expérience.

Objectif séance prochaine : continuer la rédaction du TPE et avancer le III.

### **Séance du 05/01/15 :**

En groupe avec Estevan nous nous sommes interrogés sur l'utilisation de la luminescence par l'homme.

Objectif séance : rédiger et commencer à rassembler des illustrations et trier les sources utilisées

**Séance du 12/01/15 :**

J'ai commencé à illustrer notre travail en recréant les molécules sur Avogadro notamment.

Objectif séance prochaine : rédiger la troisième partie du dossier.

**Séance du 19/01/15 :**

Rédaction de la partie sur la criminologie constituant une sous-partie de la troisième partie de notre TPE.

Objectif séance prochaine : continuer la mise en œuvre de la production écrite.

**Séance du 26/01/15 :**

Nous avons demandé l'avis des professeurs et finit la troisième partie de notre TPE dédié à l'utilisation de la luminescence par l'Homme.

## Synthèse personnelle de Julien Draussin :

Le premier choix que nous ayons eu à faire au cours de ces travaux pratiques encadrés est le choix des partenaires de travail. Si j'ai choisi de le réaliser avec Estevan Quiot et Jade Garcia Bourrée, c'est parce que nous nous connaissons depuis longtemps. Ainsi nous nous entendons bien, ce qui nous a permis de travailler dans une bonne ambiance ; et d'autre part, parce que notre sérieux à tous les trois garantissait une bonne dynamique de travail. De plus, notre proximité géographique constitue un avantage pour pouvoir travailler en dehors des heures de cours prévues au lycée.

Les deux disciplines concernées en TPE pour la section scientifique sont la physique-chimie et les sciences de la vie et de la Terre. Le choix du sujet a sûrement été l'étape plus compliquée me concernant. En effet nous n'avions pas toujours été d'accord sur les différents thèmes proposés. Nous allions opter pour un sujet concernant les nouvelles « technologies » au service de la santé mais le manque d'expérience scientifique nous a fait changé d'optique. Nous avons finalement opté pour le sujet de la luminescence qui a plu à tous les membres du groupe.

Ce sujet s'inscrit dans le thème national nommé « matière et forme. En effet, notre dossier traite de la matière vivantes c'est à dire les animaux produisant de la lumière. De plus, le phénomène de la bioluminescence provient de la matière, vivante ou inerte.

Après avoir choisi le sujet, nous avons tenté de trouver une problématique permettant d'aborder, dans un plan cohérent, des notions de physique-chimie et de SVT. Une fois la problématique trouvée, il a fallu élaborer un plan. Ce fut également une partie importante de notre TPE. Ce plan ne fut pas simple à élaborer puisqu'il a quelque peu évolué au cours de nos recherches sur le sujet.

Ensuite, la rédaction est l'étape la plus longue qui demande un travail de recherche important ; d'ailleurs nous avons parfois eu du mal à trouver notre bonheur sur internet. Pour rédiger les différentes parties de notre dossier nous étions seuls ou par groupe de deux. Nous nous répartissions donc les parties pour chaque personne. En effet, cette répartition du travail a permis de gagner du temps car la rédaction d'une partie a trois été compliqué dû à nos différents points de vue et constitué une perte de temps.

Après avoir donner notre protocole une semaine à l'avance afin que les préparatrices rassemblent le matériel, nous avons réalisé notre expérience. Celle-ci s'est déroulée sans souci particulier en prenant les précautions nécessaires vis à vis des produits dangereux (blouse, gants...). Les résultats obtenus au cours de cette expérience ont été concluants et nous a permis de tirer les conclusions nécessaires à la suite de notre dossier.

Cependant, les séances de TPE passent vite et nous avons par conséquent dû finaliser notre dossier pendant les vacances et les week-ends et réaliser le diaporama qui nous servira de support lors de l'oral.

Ce TPE m'a permis de prendre conscience de ce qu'était réellement une le phénomène luminescent. En effet si ce phénomène connu de tous, il s'agit en fait d'une réaction complexe et nécessaire aux êtres vivants. J'ai découvert un sujet extrêmement intéressant, sur lequel je ne me serais probablement pas penché spontanément.

Ces quelques mois de travail m'ont également permis d'apprendre à travailler en groupe sur un sujet commun. J'ai pris conscience des contraintes, des compromis à faire, de l'investissement et de la rigueur que j'ai su impliquer dans cette situation. J'ai également pu apprendre à poursuivre un

travail de recherches sur plusieurs mois, en organisant chronologiquement mes recherches et en étant capable d'assurer le programme scolaire en parallèles tout en gardant en tête la question de la luminescence.

Ce TPE a donc été extrêmement enrichissant, sur un point de vue intellectuel comme sur un point de vue méthodologique.

## ***Bibliographie***

<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/luminescence/48050>  
[http://nicolem.chez-alice.fr/pg\\_biolum/chap4.html](http://nicolem.chez-alice.fr/pg_biolum/chap4.html)  
<http://tpe-bioluminescence.e-monsite.com/pages/plus-de-cas-1.html>  
[http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/aurore\\_polaire/24145](http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/aurore_polaire/24145)  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Aurore\\_polaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Aurore_polaire)  
[http://www.chimie magique.fr/?page\\_id=886](http://www.chimie magique.fr/?page_id=886)  
<http://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/20130522.OBS0162/des-plantes-bioluminescentes-pour-eclairer-les-villes.html>  
[http://www.maxisciences.com/arbre/et-si-des-arbres-bioluminescents-remplaceraient-l-039-eclairage-public\\_art32295.html](http://www.maxisciences.com/arbre/et-si-des-arbres-bioluminescents-remplaceraient-l-039-eclairage-public_art32295.html)  
Manuel de Physique-Chimie, édition Bordas, 1eS  
Dictionnaire Larousse  
Manuel de SVT, édition Bordas, seconde  
Magazine Science et Avenir, article « des plantes bioluminescentes pour éclairer les villes »  
Article « Emission de lumière chez le vivant - bioluminescence » par le laboratoire de biologie marine (musée maritime de Tatihou)  
[http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin\\_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/330\\_juil\\_aout\\_sept\\_05/KF\\_n330\\_p36-44\\_w.pdf](http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/330_juil_aout_sept_05/KF_n330_p36-44_w.pdf)  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Bioluminescence>  
[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/28211/ALS\\_2005\\_1-4\\_56.pdf?..](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/28211/ALS_2005_1-4_56.pdf?..)  
<http://www.futura-sciences.com/magazines/nature/infos/actu/d/zoologie-bioluminescence-revele-pollutions-35426/>  
<http://bionique.artbite.fr/>  
<http://madmagz.com/fr>  
<http://www.sarhaduquesne.50webs.com/site/applications.html>

### Références des illustrations :

<http://www.azurever.com/kuala-lumpur/visiter/merveilles-naturelles-de-kuala-lumpur-les-lucioles-de-kuala-selangor>  
<http://www.arastiralim.net/ilk/tag/hayvanlar-alemi/page/42>  
<http://coxcorns.free.fr/bio/I2.htm>  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Rapha%C3%ABl\\_Dubois](http://fr.wikipedia.org/wiki/Rapha%C3%ABl_Dubois)  
<http://www.piecejointe.com/pps-humour/Il-etait-genial-il-vient-de-nous-quitter-54038.html>  
<http://www.naturoptic.com/comment-choisir/microscopes/microscope.php>  
<http://bioluminescence-rocroy.e-monsite.com/pages/i-fonctionnement/interets-de-la-bioluminescence-dans-la-nature.html>  
<http://bioluminescence-rocroy.e-monsite.com/pages/i-fonctionnement/un-phenomene-naturel.html>  
<http://bionique.artbite.fr/Poissons-lumineux.html>  
<http://soni2006.hubpages.com/hub/buy-krill-oil-or-fish-oil-what-are-krills>  
[http://tpe.bioluminescence.free.fr/galerie\\_photos6.html](http://tpe.bioluminescence.free.fr/galerie_photos6.html)  
[http://imxo.in.ua/uk/6\\_liudina-i-nauka/33\\_fakti/1692\\_svetiashchiesia-bakterii/](http://imxo.in.ua/uk/6_liudina-i-nauka/33_fakti/1692_svetiashchiesia-bakterii/)  
[http://www.univers-astronomie.fr/articles/systeme\\_solaire/119-les-aurores-boreales-et-australes.html](http://www.univers-astronomie.fr/articles/systeme_solaire/119-les-aurores-boreales-et-australes.html)  
<http://luminescence-du-vivant.e-monsite.com/pages/la-photoluminescence.html>  
<http://tpe-bioluminescence.e-monsite.com/album/especes-animales-terrestres/>  
<https://labgeekchic.wordpress.com/2013/05/12/deep-sea-sea-cucumbers-a-love-story/>  
[http://inforsciences8.ulb.ac.be/videos/pds2010/files/expo/sciences/chimie/luminescence\\_tous.pdf](http://inforsciences8.ulb.ac.be/videos/pds2010/files/expo/sciences/chimie/luminescence_tous.pdf)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagramme\\_de\\_Jablonski.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagramme_de_Jablonski.png)  
<http://raymond.rodriquez1.free.fr/Textes/213.htm>